

# 1. PÄIKESEKIIRGUS MAAL. KASVUHOONEEFEKT

Praktiliselt kõik maapinnal, hüdrofääris ja atmosfääris toimuvad protsessid saavad oma energia Päikeselt. Maa sisemusest saabuv geotermalne energia moodustab päiksekiirgusest vaid **0.025%**, fossiilsete kütuste põletamine, **0.007%**.

## 1.1. Solaarkonstant planeet Maa jaoks

Solaarkonstandiks nimetatakse päiksekiirguse vootihedust ehk kiiritustihedust (*irradiance*) maailmaruumis Maa-Päike **keskmisel kaugusel**. Harilikult mõeldakse mitte spektraalset, vaid üle kõikide lainepikkuste integreeritud kiirgust, nn *laiaribalist (broadband)* ehk *integraalset* suurust. Kasutatakse ka: *päiksekiirguse kiiritustihedus atmosfääri ülapiiril*.

Tähistused:  $S, S_0, I_0, F_0, J_0, E_0$  jne. Rangelt võttes pole see konstant (Päikesel on plekid), praegu kasutatavad väärtused:  $S_0 = 1.360\text{--}1.368 \text{ kW m}^{-2}$ .

Viimastel aastakümnetel on olnud enim kasutatavad väärtused:

$$\underbrace{S_0 = 1.360\text{--}1.361}_{\text{Viimastes kliimamudelites (Martin Wildi tööd)}} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}, \quad \underbrace{S_0 = 1.367}_{\text{WMO aktseptitud (1982) solaarkonstant}} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}. \quad (1.1.1)$$

**Märkus.** Valemites, kus esitatakse atmosfääri läbinud Päikese otsekiirgust mingil kuupäeval, tähistatakse atmosfääri ülapiiri pinnaühikule konkreetse kuupäeval langevat Päikese otsekiirgust samade sümbolitega  $S_0, I_0, F_0$  jne. Kuid atmosfääri ülapiirile langev otsekiirgus on võrdne solaarkonstandiga ainult kahel kuupäeval aastas – **04. aprillil** ja **05. oktoobril**, siis kui **Maa-Päike** hetkeline kaugus on võrdne oma keskvärtusega, **1 AU**, üks *astronoomiline ühik (astronomical unit, AU)*.

Käsitlustes, kus vaheldumisi räägitakse nii solaarkonstandist kui ka atmosfääri ülapiirile mingil kuupäeval langevast kiirgusest, tuleks need mõisted eraldi tähistada, seepärast lisatakse solaarkonstandi tähisele tärn:

$$\underbrace{S_0^* = 1.367}_{\text{solaarkonstant Maa-Päike keskmisel kaugusel}} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}. \quad (1.1.2)$$

Mingil suvalisel hetkel **atmosfääri ülapiiri pinnaühikule** (mis on risti päiksekiirtega) ajaühikus langev kiirgusenergia  $S_0$  – selle hetke solaarkonstant, sõltub vastava konkreetse hetke Maa-Päike kaugusest  $d$ :

$$\underbrace{S_0}_{\text{konkreetselt hetke solaarkonstant}} = \frac{d_0^2}{d^2} S_0^* = \frac{1}{\rho^2} S_0^*, \quad (1.1.3)$$

kus  $d_0$  on Maa-Päike keskmine kaugus ehk astronoomiline pikkusühik:

$$d_0 = 1 \text{ AU} = 1.495 \cdot 10^{11} \text{ m} = 1.495 \cdot 10^8 \text{ km} = 149.5 \cdot 10^6 \text{ km} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}.$$

Maa-Päike hetkelist kaugust astronoomilistes ühikutes tähistatakse mõnikord sümboliga  $\rho$ .

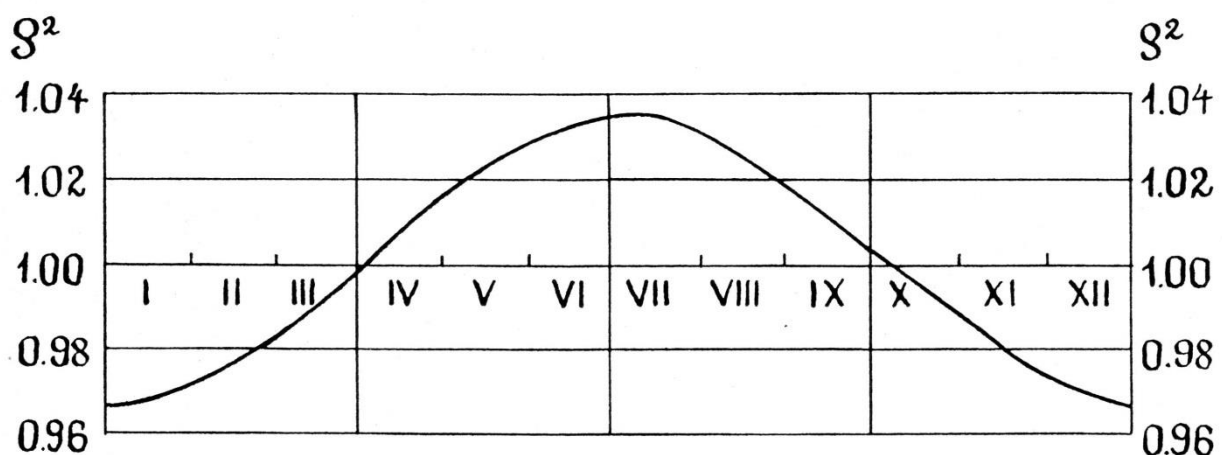
**NB!** Tabelid ja lähendvalemid on antud tavaliselt mitte  $\rho$ , vaid  $\rho^2$  või isegi  $1/\rho^2$  jaoks.

Tavatäpsuse juures (klassikalised aktinomeetrilised mõõtmised, piirviga **1–10%**) ei ole vaja  $\rho$  antud kuupäeva väärtust isegi siduda konkreetse aastaga, piisab kuupäevast.

**NB!** Kuid tabelite ja valemite kasutamisel tuleb ikkagi kontrollida, kas tulemus on  $\rho$ ,  $\rho^2$  või  $1/\rho^2$  jaoks. Tabelis 1 ja joonisel 1 on tegemist  $\rho^2$ -ga. Kontrolliks piisab **jaanuarikuu** või **juulikuu** alguse väärtuste ülevaatamisest, sest  $\rho$  muutub aasta jooksul piirides  $\pm 0.017$ , ja  $\rho^2$  vastavalt piirides  $\pm 0.034$ .

Tabel 1. Astronoomilistes ühikutes antud Maa-Päike kauguse ruut,  $\rho^2$

Kuu Päev	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	<b>0.967</b>	0.971	0.983	0.999	1.015	1.028	1.033	1.030	1.018	1.002	0.985	0.972
10	0.967	0.974	0.987	1.004	1.020	1.031	<b>1.034</b>	1.027	1.014	0.997	0.981	0.970
20	0.968	0.978	0.992	1.009	1.024	1.032	1.032	1.024	1.008	0.991	0.976	0.968



Joon. 1. Suuruse  $\rho^2$  aastane käik ( $\rho$  – Maa-Päike kaugus).

**Küsimus.** Tabel 1 on jätkuvalt kasutusel praktilistes arvutustes. Miks ei kasutata vastavaid lähendvalemeid? Avaldage arvamust.

Läbi atmosfääri aluspinnani jõudnud Päikese otsekiirgust tähistatakse sümboliga  $S_m$ , kus indeks  $m$  tähendab kiirte teele jäävaid atmosfäärikihte, nn massiarvu. Merepinnal seniidi suunas,  $m = 1$ , matemaatilise horisondi suunas,  $m = 37.8$ .

## 1.2. Solaarkonstandi varasem ühik

Kuni SI-süsteemi valdava kasutuselevõtuni aktinomeetrias (1970te alguseni) kasutati paljude aastakümnete jooksul nii solaarkonstandi kui mitmesuguste päikesekiirguse komponentide (otsekiirgus, hajuskiirgus, summaarne kiirgus, peegeldunud kiirgus jne) esitamiseks ühikut

$$\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}},$$

A **calorie** is a unit of (thermal) energy. One **small calorie** is approximately **4.2 joules** (so one **large calorie** is about **4.2 kilojoules**).

$$1 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} = \frac{4.1868 \text{ J}}{10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 60 \text{ s}} = \frac{41.868 \cdot 10^3 \text{ W}}{\text{m}^2 \cdot 60} = 0.6978 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}, \quad (1.2.1)$$

$$1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 1.433 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}}, \quad (1.2.2)$$

$$S_0^* = 1.367 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 1.367 \cdot 1.433 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} = 1.959 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} \approx 1.96 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}},$$

$$S_0^* \approx 2 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}}, \text{ selline konstant oli väga sobiv kiireteks hinnangulisteks arvutusteks!}$$

### 1.3. Solaarkonstandi määramine Bouguer-Langley meetodil

Praegusel satelliitide ajastul domineerib solaarkonstandi atmosfääriväline mõõtmine satelliitidelt. Kuid juba 1932 määrati solaarkonstant üsna täpselt maapealsete mõõtmistega nn *Bouguer-Langley* meetodil, Päikese otsekiirguse spektraalmõõtmistest. Kirjeldame seda meetodit. Lähtume kiirguse eksponentsiaalset nõrgenemist väljendavast *Bouguer-Lamberti* valemist spektraalkujul

$$S_{m\lambda} = S_{0\lambda} e^{-\delta_\lambda m}, \quad (1.3.1)$$

kus:  $S_{m\lambda} = S_m(\lambda)$  – atmosfääri läbinud Päikese spektraalne otsekiirgus;

$S_{0\lambda} = S_0(\lambda)$  – Päikese spektraalne otsekiirgus atmosfääri ülapiiril, otsitav suurus;

$m$  – atmosfääri nn *optiline massiarv*, kujutab endast Päikese või mõnes muus vaatesuunas olevat atmosfäärikihtide arvu;  $m = 1$  seniidi suunas,  $m = 1.99 \approx 2$  Päikese kõrgusel  $30^\circ$  horisondist,  $m \approx 37.8$  matemaatilise horisondi suunas;

$\delta_\lambda = \delta(\lambda)$  – otsekiirguse spektraalne nõrgenemistegur, atmosfääri nn *spektraalne optiline paksus, optiline sügavus* (optiline tihedus?!).

**Küsimus.** Kas oskate põhjendada valemit (1.3.1)?

Logaritmides valemit (1.3.1) saame massiarvu  $m$  suhtes lineaarse võrrandi:

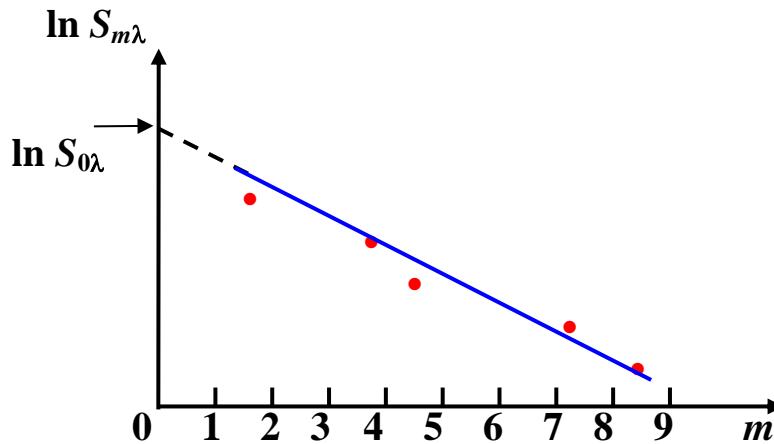
$$\ln S_{m\lambda} = \ln S_{0\lambda} - \delta_\lambda m. \quad (1.3.2)$$

Sõltuvalt mõõtmiskoha laiuskraadist, saab selge ilma korral teha mitmeid spektraalse otsekiirguse  $S_{m\lambda}$  mõõtmisi, mis vastavad erinevatele Päikese kõrgustele, seega erinevatele massiarvudele  $m$ . Paigutades graafiku vertikaalteljele  $\ln S_{m\lambda}$  ja horisontaalteljele massiarvud  $m$ , saame midagi analoogset joonisel 1 kujutatule.

Minimaalne massiarv, mille korral maapealseid mõõtmisi saab, mägedesse minemata, teha, on seniidis oleva Päikese korral, siis  $m = 1$ . Otsitav on aga  $S_{m\lambda}$  väärtus  $m = 0$  korral. Pikendades (ekstrapoleerides) regressioonisirget vertikaaltelje suunas, annab lõikepunkt vertikaalteljega otsitava atmosfäärivälise **spektraalse** otsekiirguse  $S_{0\lambda}$  antud kuupäeval.

**Integraalne** (laiaribaline, *broadband*, kõiki lainepikkusi hõlmav) atmosfääriväline otsekiirgus (antud päeval) leitakse integraalina üle lainepikkuste

$$S_0 = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{0\lambda} d\lambda. \quad (1.3.3)$$



Joon. 2. Illustratiivne skeem Bouguer-Langley meetodist atmosfäärivälise spektraalse otsekiirguse  $S_{0\lambda}$  leidmiseks. Skeemi järgi on suurim Päikese kõrgus, millel otsekiirguse mõõtmine on toimunud,  $m \approx 1.7$ , väikseim Päikese kõrgus massiarvul  $m \approx 8.5$  (vastab Päikese kõrgusele ca  $h \approx 6.25^\circ$ ).

Kuigi Bouguer-Langley meetod on olnud laialt kasutusel, on sellel ka puudused:

- $O_3$  neelab ära praktiliselt kogu päiksekiirguse  $\lambda < 300 \text{ nm}$ , mitte vastavalt optilise paksuse ja massiarvu korrutisele  $\delta_\lambda \times m$ ; seetõttu UV kalgim osa,  $\lambda < 300 \text{ nm}$  ei jõuagi aluspinnani, seega tuleb spektri UV-osa ja osooni panust kuidagi teisiti arvestada;
- infrapunases osas on põhiline neelaja veeaur, mille sisaldus kondensatsiooninivoost kõrgemal on väga väike, seega tuleb päiksespektri IP-osa samuti kuidagi teisiti arvestada, näiteks lähendades IP-piirkonda absoluutselt musta keha kiirgusega ( $\approx 5800 \text{ K}$ ), mõõtes atmosfäärisamba veeaurusisalduse optiliselt, jne;
- joonisel (2) kujutatu annab solaarkonstandi hinnangu vaid ühel lainepikkusel, kogu kaasaegne detailseim päiksespekter koosneb 2460-st  $S_{0\lambda}$  väärtusest (Gueymard-2003;  $0.5 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$ ;  $S_0^* = 1366.1 \text{ W/m}^2$ ), seega on spektri mõõtmised ja arvutused töömahukad;
- et saada piisavalt paljude massiarvude  $m$  (st päiksekõrguste) juures  $S_{m\lambda}$  väärtusi ja sirge usaldusväärsed käiku, tuleb mõõta vähemalt poole päeva jooksul, sel ajal ei tohi ilmastikuolud muutuda; mõõtes samal Päikese kõrgusel aga nii enne kui pärast keskpäeva, saadakse graafikule rohkem punkte, kuid on oht, et atmosfääri koostis on vahepeal muutunud.

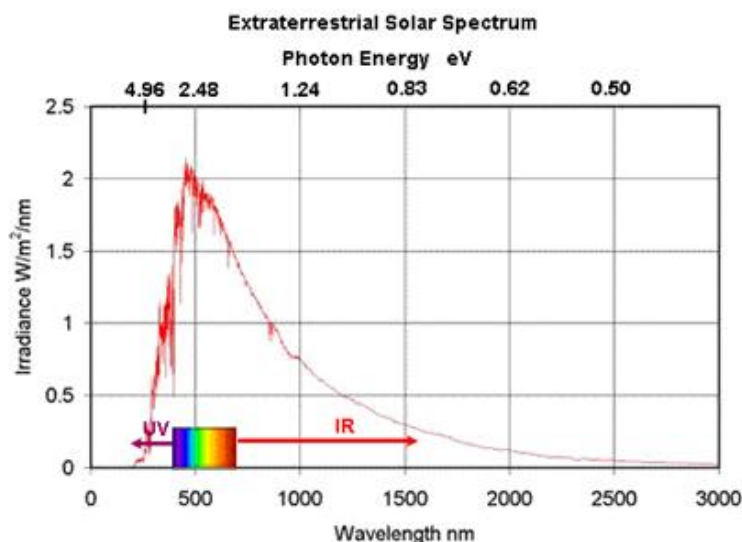
**Küsimus.** Kas Bouguer-Langley meetod on kasutatav ka integraalse päiksekiirguse korral?

### 1.4. Päikesekiirguse erineva täpsusega spektrid

Sõltuvalt lahendatavate atmosfäärioptiliste või valgustusülesannete detailsusest on kasutusel erineva täpsusastmega päikesekiirguse spektrid – kiiritustihedus lainepikkuse ühiku kohta atmosfääri ülapiiril Maa-Päike keskmisel kaugusel.

**Küsimus:** milline võiks olla päikesekiirguse spektraalse tiheduse ühik?

Küllalt täpne päikesespekter on joonisel 3. Aga NB! Analüüsige vertikaaltelje ühikut ja spektri maksimumlainepikkust.

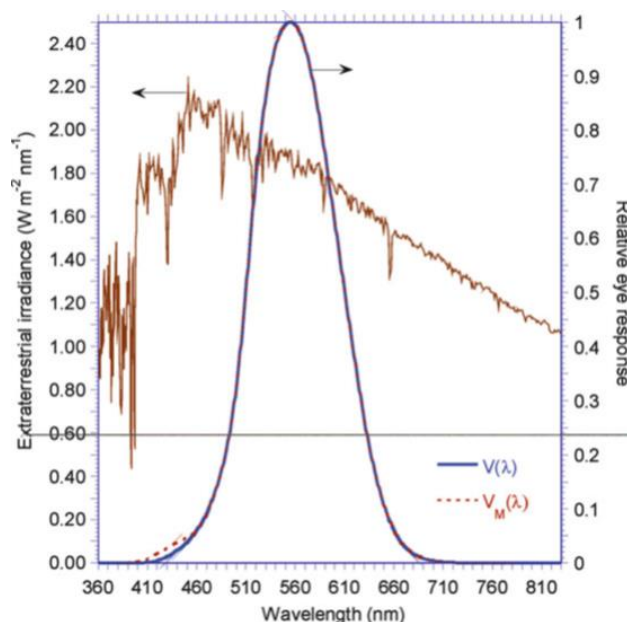


Joon. 3. Päikese kiiritustiheduse üsna täpne spekter Maa atmosfääri ülapiiril.

**UV–5%, visible–52%, IR–43%.  $S_0^* = 1367 \text{ W/m}^2$ .** Ekvaatoril jõuab keskpäeval aluspinnani ca  **$1 \text{ kW m}^{-2}$** . Ilmselt Fröhlich & London (1986), järgi.

[http://www.mpoweruk.com/solar\\_power.htm](http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm)

Joonisel 4 on praegusaja detailseim, päikesekiirguse nn **sünteeiline spekter** Gueymard-2003, sellele on kantud silma päevase valgustundlikkuse klassikaline kõver  $V(\lambda)$  ning pisut modifitseeritud kõver  $V_M(\lambda)$ .



Joon. 4. Päiksekiirguse kiiritustihedus atmosfääri ülapiiril Gueymard-2003 järgi ja inimsilma päevase tundlikkuse kõverad. Joonisel on kaks vertikaaltelge, nooled viitavad. Kõverate maksimumid ei paikne samal lainepikkusel, miks?

Fig. 3.2. Extraterrestrial solar irradiance in the visible spectrum comparable to International Commission on Illumination (CIE) standard photopic sensitivity  $V(\lambda)$  and the modified one,  $V_M(\lambda)$  (1990). From “Daylight science and daylight technology (Kittler, Kocifaj, Darula, 2011, p. 53; Scanned Doc\Kittler-Kocifaj).

Gueymard-2003 sünteetilise spektri maksimum:  $S_0(451 \text{ nm}) = 2.208 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ nm})$ .

Gueymard-2003 sünteetilise spektri ulatus, **0.5 nm – 1 mm**, kokku spektris **2460** punkti.

Gueymard-2003 sünteetilise spektri integreerimisel solaarkonstant:  $S_0^* = 1366.1 \text{ W}/\text{m}^2$ .

### 1.5. Inimsilma tundlikkus

Inimsilma suhtelise spektraaltundlikkuse funktsioon ehk valgusefektiivsuse funktsioon  $V(\lambda)$  omab päevase nägemise režiimis maksimumi lainepikkuse **555 nm** juures (**kollakasroheline valgus**). On huvitav märkida, et atmosfääri läbinud päiksekiirguse spektris (“atmosfääri põhjas”) vastab sellele, inimsilma kõige tundlikumale lainepikkusele, ka kõige suurem päiksekiirguse intensiivsus. **Suhtelise valgusefektiivsuse funktsiooni** maksimumväärtus võetakse sellel lainepikkusel võrdseks ühega

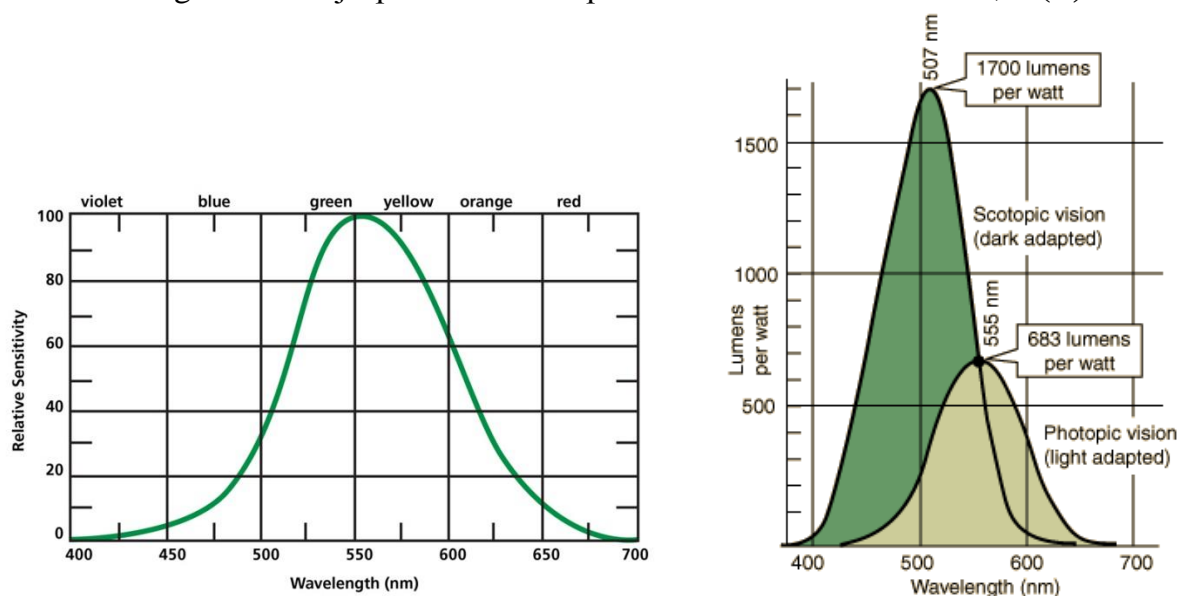
$$V(555 \text{ nm}) = 1. \quad (1.5.1)$$

Mistahes teise lainepikkuse, erineva kui **555 nm**, olgugi et niisama suure energiavoo korral on visuaalselt tajutav valguse intensiivsus väiksem:

$V(500 \text{ nm}) = 0.323$ , vähenemine ca **3 korda**,

$V(490 \text{ nm}) = 0.208$ , vähenemine ca **5 korda**.

Nähtavast valgusalast väljaspool on silma spektraaltundlikkusfunktsioon,  $V(\lambda) = 0$ .



Joon. 5. Inimsilma suhtelise spektraaltundlikkuse ehk valgusefektiivsuse kõverad, vasakul päevane kõver. **Photopic Vision, Scotopic Vision** (kr k *skotos* . pimedus).

[http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/relative\\_irradiance\\_graph-04.jpg](http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/relative_irradiance_graph-04.jpg)



Öine nägemine on tundlikum, tundlikkuse maksimum nihutatud lühemate lainepikkuste poole. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/bright.html#c3>

**Küsimus 1:** kas parempoolsel joonisel peab öise nägemise kõver lõikuma päevasega lainepikkusel **555 nm** või peaks joonise koostama kuidagi teisiti? Vihje: öise ja päevase nägemise retseptorid silmas on erinevad.

**Küsimus 2:** millist värvi tajub inimsilm halvemini öisel nägemisel, tooge näiteid.

## 1.6. Päikese valguskonstant ja valgusviljakus

Arvestades valguse võimet tekitada valgusaistingut, iseloomustatakse atmosfäärivälist valguse intensiivsust nn fotomeetrilise suurusega  $\Phi$ , mida nimetatakse *valgusvooks*

Kogu integraalne ehk laiaribaline, kõiki nähtavaid lainepikkusi hõlmav Päikese valgusvoog:

$$\Phi_0 = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} d\Phi_0 d\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} V(\lambda) S_0(\lambda) d\lambda, \quad (1.6.1)$$

kus:  $\lambda_{\min} = 380$  ja  $\lambda_{\max} = 780 \text{ nm}$ ,

$V(\lambda)$  – inimsilma suhteline valgustundlikkus,

$S_0(\lambda)$  – Päikese kiirgusvoo spekter, Maa-Päike keskmisel kaugusel, energeetilistes ühikutes.

Suhteline valgustundlikkus  $V(\lambda)$  on dimensioonitu, järelikult on valemi (1.6.1) järgi valgusvoo ja energiavoo dimensioonid ühesugused. See võimaldab defineerida valgusvoogu kui kiirgusvoogu, mille suurust hinnatakse tekitatud valgusaistingu tugevuse järgi.

Seega võib valgusvoogu nimetada *visuaalseks kiirgusvooks* (selle konspekti termin).

Võttes valemis (1.6.1) päikesekiirguse spektri Gueymard-2003 spektri, saame integreerimistulemuseks Päikese visuaalse kiirgusvoo tiheduse Maa atmosfääri ülapiiril energeetilistes ühikutes (integreerimine Gueymard-2003 spektri järgi; E:\Gueym\Synth solar.. xls\):

$$\Phi_0 = \int_{380}^{780} V(\lambda) S_0(\lambda) d\lambda = \underbrace{195.75 \text{ W m}^{-2}}_{\text{Päikese valguskonstant energeetilistes ühikutes}}. \quad (1.6.2)$$

Päikese valguskonstant energeetilistes ühikutes

Viimane tulemus võimaldab hinnata, kui suur osa päikesekiirgusest tekitab valgusaistingut:

$$\frac{\Phi_0}{S_0^*} = \frac{195.75 \text{ W m}^{-2}}{1366.1 \text{ W m}^{-2}} = 0.143 \text{ ehk ainult } 14.3\%. \quad (1.6.3)$$

Tavaliselt ei väljendata Päikese valguskonstanti siiski energeetilistes ühikutes, energiavoo-na, nagu valemis (1.6.2) vaid valgusvoona, mille ühik on **luumen (lm)** (Risthein, 1982, 42):

**luumen** – SI valgusvoo ühik; ühtlasest punktkiirgurist, valgustugevusega **1 kandela**, ühikruuminurka (**1 sr**) kiirguv valgusvoog: **1 lm = 1 cd · sr**; tegelikult, paremaks arusaamiseks on mõistlik luumen defineerida järgmiselt:

$$1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{\text{sr}}; \quad (1.6.4)$$

**kandela** – SI valgustugevusühik; monokromaatilise kiirgusallika valgustugevus on **1 kandela**, kui ta kiirgab sagedusega  **$540 \cdot 10^{12}$  Hz** ja tema kiirgustugevus antud suunas on  **$1/683$  W/sr**.

**Küsimus:** miks on valitud kiirgussagedus  **$540 \cdot 10^{12}$  Hz**, milline on selle kiirguse lainepikkus,  **$\lambda$** , nanomeetrites?

Soovides minna Päikese valguskonstandi  **$\Phi_0$**  energeetiliselt esituselt luumenitele, tuleb valguskonstandi korrutada üleminekukonstandiga  **$K_m$** , mis asendab vattid (**W**) luumenitega (**lm**):

$$K_m = 683 \text{ lm/W}, \quad (1.6.5)$$

siis saame Päikese valgusvoo tiheduse Maa atmosfääri ülapiiril ehk Maa atmosfääri ülapiiri valgustatuse (**valgustiheduse**) ehk Päikese valguskonstandi (vaikne eeldus: Maa-Päike keskmisel kaugusel):

$$\Phi_0 = 195.75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} = 133694 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 133694 \text{ lx} \approx 133.7 \text{ klx}. \quad (1.6.6)$$

Jagades tulemust Gueymard-2003 solaarkonstandiga,  **$1366.1 \text{ Wm}^{-2}$** , saame Päikese valgusviljakuse, esmalt valgusviljakuse definitsioon:

$$\eta = \frac{\text{valgusallika valgusvoog(lm)}}{\text{tarbitav võimsus (W)}} = \text{valgusviljakus}, \frac{\text{lm}}{\text{W}}, \quad (1.6.7)$$

$$\eta_{\text{Päike}} = \frac{133694 \text{ lm/m}^2}{1366.1 \text{ W/m}^2} = 97.87 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \approx 98 \frac{\text{lm}}{\text{W}}. \quad (1.6.8)$$

Tabel 2. Mõnede valgusallikate valgusviljakused

Valgusallikas	Luminous efficacy of radiation (lm/W)	Luminous efficiency (suhteline valgusviljakus)
Typical tungsten light bulb at 2800 K	15	2.2%
Energy-sparing light bulb	50	7.3%
Ideal black-body radiator at 4000 K	54.7	8.0%
Class G star (Sun, Capella), 5800 K	93	13.6%
Ideal black-body radiator at 7000 K	95	13.9%
Ideal 5800 K black-body, truncated to 400–700 nm (ideal "white" source)	251	36.7%
Theoretical limit for a white LED	300	43.9.0%
Ideal monochromatic 555 nm source	683	100%

[https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_efficacy#Luminous\\_efficacy\\_of\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy#Luminous_efficacy_of_radiation)

**Buy Lumens, Not Watts!**

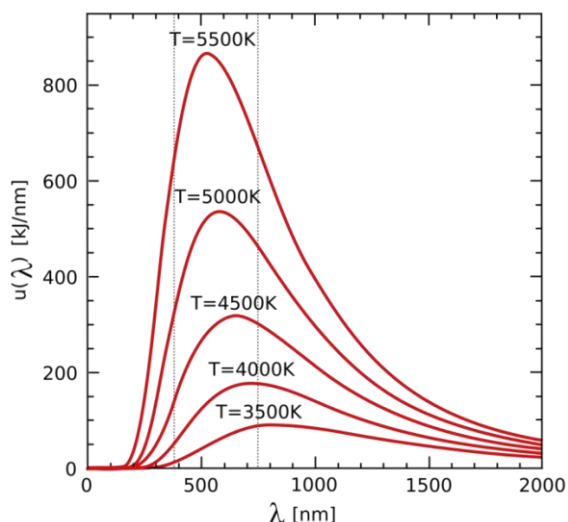
**Küsimused:** 1) miks Päikese energeetiline spekter on ainult ligikaudselt lähendatav mustkiirguri omaga, miks Päike pole põhimõtteliselt mustkiirgur?



2) miks Päikese valgusviljakus on suurem kui mustkiirguri oma **5800 K** juures (piirduge formaalse vastusega)?

### 1.7. Päikesekiirguse ligikaudsed spektrid

Päikesekiirguse ligikaudsed spektrid on vajalikud mitmesugusteks atmosfääri kiirgus- ja valgusenergeetilisteks arvutusteks. Väga levinud on päikesekiirguse lähendamine absoluutselt musta keha ehk mustkiirguri spektriga. Kvalitatiivselt on asi lihtne, musta keha kiirguse saab ju arvutada Plancki valemist, arvutustulemused graafikute kujul on paljudes käsi-raamatutes ja Internetis (joon. 6).



Joon. 6. Plancki valemi järgi arvutatud mustkiirguri kiirguse spektraalsed jaotused. Mustkiirguri temperatuuri alanedes nihkub kiirgus pikemate lainepikkuste poole.

NB! Analüüsige vertikaaltelje ühikut, on sellele õigustus?

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/21/Wiens\\_law\\_vis\\_limits.svg/2000px-Wiens\\_law\\_vis\\_limits.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/21/Wiens_law_vis_limits.svg/2000px-Wiens_law_vis_limits.svg.png)

Plancki valemist järeldub ka **Wieni nihkeseadus** (tõestatakse optikakursuses):

$$\lambda_{\max} = \frac{2900 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}$$

[Hanno-E\Gueymard\Synthetic solar spectrum+Hanno\\_Gueym-2003.xlsx](#)

$T$	$\lambda_{\max}, \mu\text{m}$
<b>6000</b>	<b>0.483</b>
<b>5800</b>	<b>0.500</b>
<b>5777</b>	<b>0.502</b>
<b>5600</b>	<b>0.518</b>

Kuid Plancki valemi praktilisel kasutamisel võivad kergesti probleemid tekkida, analüüsige näiteks joonise 6 vertikaaltelje ühikut.

Koostame Plancki valemi praktilise kasutamise näitena planeet Maa jaoks spektraalse solaarkonstandi arvutusvalemi, seda muidugi eeldusel, et Päike on mustkiirgur.

**Plancki valem**, otsing Internetis annab, “The spectral *radiance* per unit wavelength”:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (1.7.1)$$

The SI unit of  $B_\lambda$  is  $\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$ .

[https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law)

**Märkus:** Plancki mustkiirguri valem puudub Halliday-Resnick-Walkeri õpikus.

Õpikud, milles Plancki valemit kirjeldatakse, piirduvad sageli ebamäärase selgitusega, et valem kirjeldab kiirgusenergia jaotust absoluutselt musta keha spektris.

Ei vene ega eesti keeles ei ole terminile *radiance* head vastet. Vene keele eeskujul võiks kasutada terminit '**intensiivsus**' (Kondratjevi monograafiad), kuid '**intensiivsus**' on liiga universaalne ja ületarbitud ning seetõttu ebamäärane ja kasutatav pigem universaalse asendusterminina mitmesuguste kiirgusparameetrite defineerimisel.

Vene keeles on veel pakutud: *лучистость, энергетическая яркость* (Risthein, 1982, 27).

Eesti keeles pakutakse terminit *kirkus*: **kiirgusenergia pinnauhikult ruuminurga ühikusse** (Risthein, 1982, 27). Vastavalt siis, *spektraalne kirkus* ja *integraalne kirkus*.

Suurusel *radiance* kvantitatiivselt rääkides tuleks alati rõhutada ühikut,

**spektraalne *radiance*** (lainepikkuse ühiku kohta):

$$\mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}}, \quad \mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \mu m}, \quad \mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} nm};$$

**integraalne *radiance*** (integreeritud üle lainepikkuste):

$$\mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}}, \quad \mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}}, \quad \mathbf{W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}}.$$

Arvutuste lihtsustamiseks vabanetakse valemis (1.7.1) kolmest klassikalisest konstandist (***h***, ***c***, ***k***):

Plancki konstant, ***h* = 6.62 · 10<sup>-34</sup> J · s**,

valguse kiirus, ***c* = 3 · 10<sup>8</sup> m · s<sup>-1</sup>**,

Boltzmanni konstant, ***k* = 1.381 · 10<sup>-23</sup> J · K<sup>-1</sup>**,

ja defineeritakse nende asemel kaks abikonstanti, ***c*<sub>1</sub>** ja ***c*<sub>2</sub>** (Lenoble, 1993, 39):

$$\mathbf{2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} W m^2}, \text{ see suurus võetakse steradiaani kohta};$$

$$\mathbf{c_1 = 2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} W m^2 sr^{-1}}, \quad (1.7.2)$$

$$\mathbf{c_2 = \frac{hc}{k} = 1.438 \cdot 10^{-2} m K}, \quad (1.7.3)$$

uusi konstante kasutades saab Plancki valem (abs musta keha spektraalne kirkus, *blackbody spectral radiance*) lihtsama kuju:

$$\mathbf{B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}}, \quad (1.7.4)$$

lainepikkus ***λ*** on siin meetrites, ***B(λ, T)*** vastab ruuminurgale **1 steradiaan**, kokku kujuneb spektraalse kirkuse ühik, ***W m<sup>-3</sup> sr<sup>-1</sup>***.

Valemid (1.7.1) ja (1.7.4) annavad spektraalse kiirguse päikeseketta pinnühikult, **1 m<sup>2</sup>**, ruuminurka **1 sr**, lainepikkuse ühiku, **1 m** kohta.

Plancki valemi programmeerimine või Gueymard-2003 spektri tabeli arvutisse kopeerimine, on siiski üsna tülikas ning võib põhjustada eksimusi. Lihtsam analüütiline päikesespektri esitus on teaduskirjanduses praktiliselt tundmatu. Teadaoleva katse on teinud vene teadlane **Vladimir G. Kastrov (1928)**:

$$S_0(\lambda) \cong C_1 \lambda^{-2.3} \exp(-0.0327 \times \lambda^{-4}), \quad (1.7.5)$$

kus  $C_1$  on proportsionaalsuskonstant (sõltub ka ühikutest).

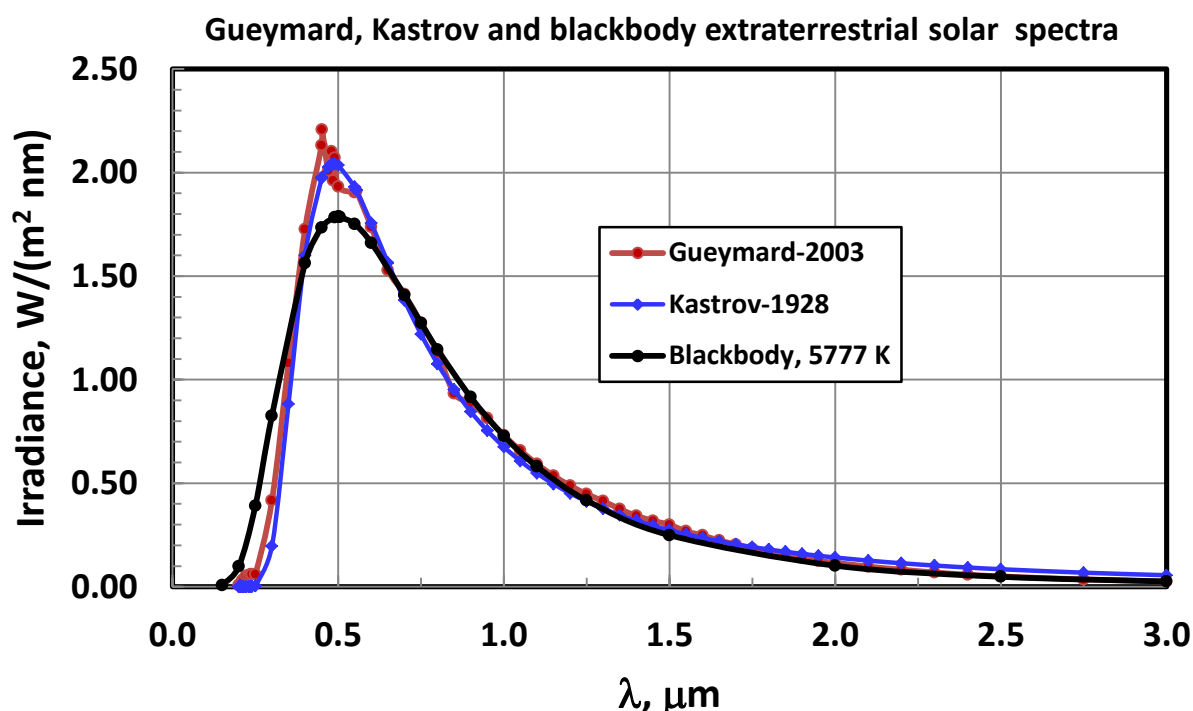
Väärtus  $C_1 = 0.0011$  kindlustab Kastrovi valemi päris hea visuaalse kokkulangevuse Gueymardi spektriga, seega Kastrovi valem päikesespektri lähendamiseks,

$$S_0(\lambda) \cong 0.0011 \times \lambda^{-2.3} \exp(-0.0327 \times \lambda^{-4}), \quad (1.7.6)$$

mis annab atmosfääri ülapiirile saabuva päikesekiirguse kiiritustiheduse ühikutes

$$[S_0(\lambda)] = \frac{W}{m^2 \text{ nm}}. \quad (1.7.7)$$

Järgmisel joonisel ongi esitatud Gueymard-2003 spekter ning selle kaks lähendust.



Joon. 7. Kaasaegne täpseim Päikese spektraalne kiiritustihedus Maa atmosfääri ülapiiril, Gueymard-2003; lähendus Kastrov-1928 valemi järgi ning mustkiirguri (5777 K) järgi.

[Hanno-E\Gueymard\Synthetic solar spectrum+Hanno\\_Gueym-2003.xlsx](#)  
[Hanno-D\Solar Energy 2015\Synthetic solar - Integration.xlsx](#)

## 1.8. Solaarkonstandi evolutsioon

Solaarkonstandi muutumist seostatakse Päikese (magnetilise) aktiivsusega, viimase väljendamise ligikaudne võimalus on Wolfi arvude  $W$  abil:

$$W = k(f + 10g), \quad (1.8.1)$$

kus  $k$  on vaatlustingimustest ja instrumendist sõltuv kordaja,  $g$  vaadeldavate laigurühmade (gruppide) arv,  $f$  kõigi nii rühmadena kui ka üksikult esinevate laikude üldarv. Wolf, kes kasutas **70-millimeetrise objektiiviga 64-kordse** suurendusega teleskoopi, võttis oma vaatluste jaoks  $k = 1$ . Suurema lahutusvõimega teleskoobi korral näeb rohkem laiike, vaatlustulemuste ühtlustamiseks tuleb võtta  $k < 1$ . Sageli esitatakse Wolfi arv kujus, kus  $k = 1$ :

$$W = f + 10 g. \quad (1.8.2)$$

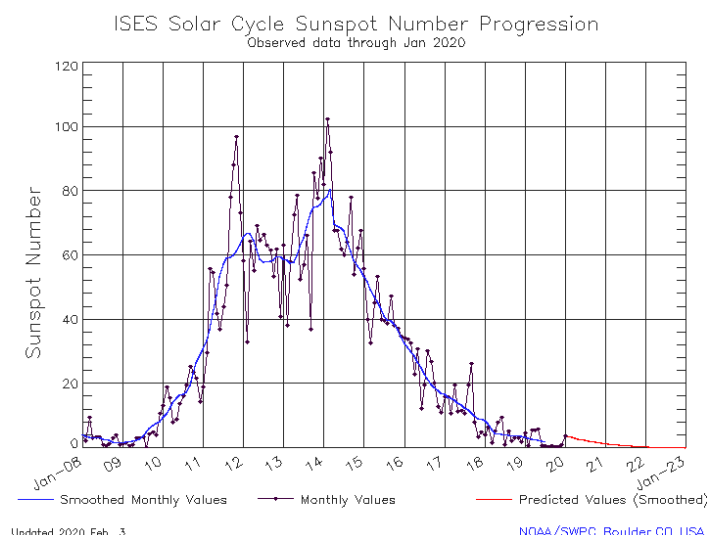
Päikese laikude arvu maksimumi ja miinimumi aastad vahelduvad rütmiliselt, keskmiselt **11 aasta** jooksul. Nimetatud 11 aastat ei ole püsiv periood, tabeli 3 järgi varieerub tsükli kestus, **9.0–13.7** aastat.

**Wolf, Rudolf (1816–1893).** Šveitsi astronoom, 1855 Zürichi ülikooli professor, 1864 Zürichi tähetorni direktor. Tegi päikeselaikude arvu aegrea põhjal kindlaks päikeseaktiivsuse perioodi olemasolu. Võttis päikeseaktiivsuse iseloomustamiseks kasutusele arvu, mis võrdub **üksiklaikude** arvu ja **kümnekordse laigurühmade** arvu summana.

Tabel 3. Väljavõte senistest päikeseaktiivsuse tsüklitest

Tsükel nr	Algus	Lõpp	Kestus (aastaid)	Max, monthly smoothed
1	1755	1766	11.3	86.5
2	1766	1775	<b>9.0</b>	115.8
3	1775	1784	9.3	158.5
4	1784	1798	<b>13.7</b>	141.1
-----	-----	-----	-----	-----
19	1954	1964	10.5	<b>201.3</b>
-----	-----	-----	-----	116.4
23	1996	2008	12.6	120.8
24	2008	2018 ??	??	81.9
25	2018 ??			
Mean			11.04	178.7

[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_cycles](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles)

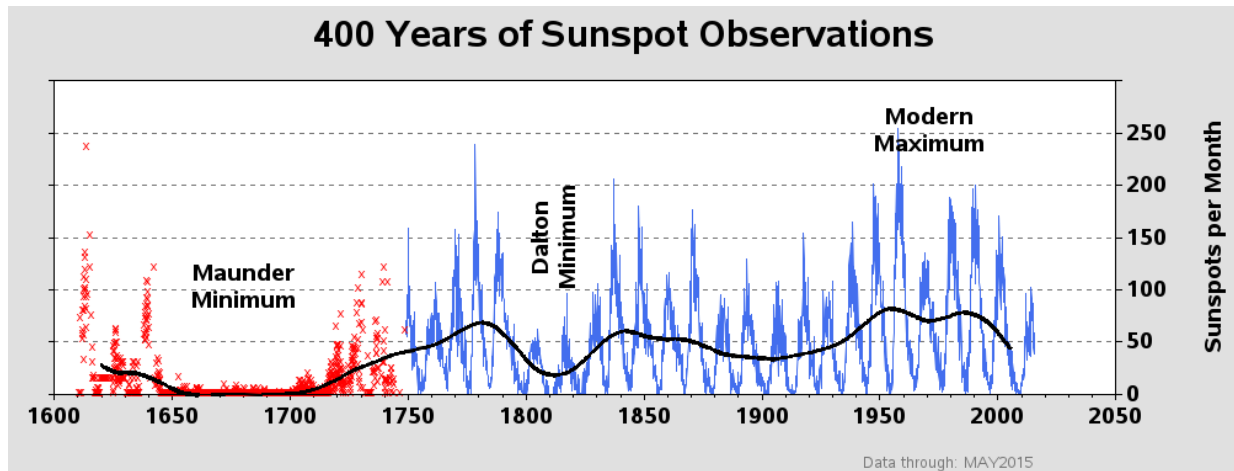


Joon. 8. Päikeseplekkide kuukeskmised (iga punkti on kuukeskmine) alates jaanuarist 2008 kuni jaanuarini 2020, edasi prognoos. Ei ole veel selge, kas on lõppenud Päikese aktiivsuse 24. tsükel ja alanud 25. tsükel.

<https://spaceweatherarchive.com/category/solar-cycle/>

Päikeseplekkide aegrida on tagasivaateliselt rekonstrueeritud kuni algusaastani 1610 (Lean, Beer, Bradley, Geophys. Res. Let., 1995).

Aastatel **1645–1715** (70 aastat) päikeseplekid praktiliselt puudusid, nn **Maunderi miinimum**. Langeb **Väikese Jääaja (1200–1850)** külmemasse perioodi (**1600–1850**) (joon. 9).



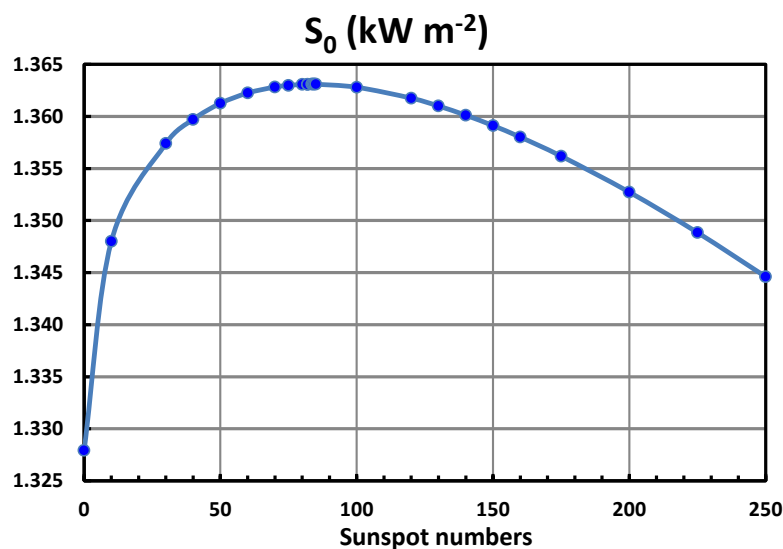
Joon. 9. Päikeseplekkide 400-aastane aegrida (vt ka joon. 10).

<http://robslink.com/SAS/democd24/sunspot.htm>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle)

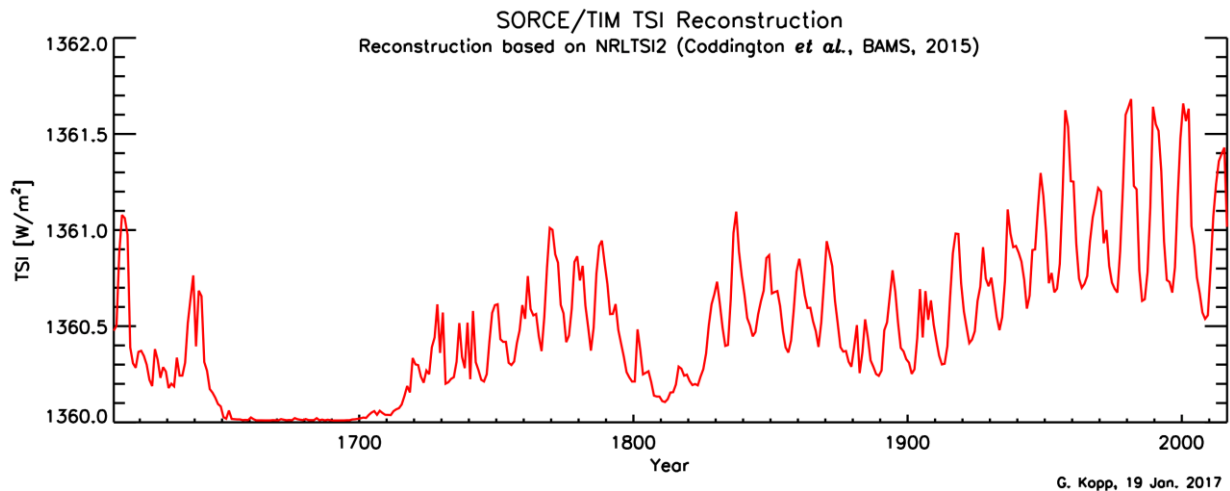
**Küsimus.** Päikeseaktiivsuse esimene tsüklil on dateeritud aastast **1755**, samas algab päikeseplekkide arvu aegrida ca aastast **1600**. Kuidas toimus aegrea pikendamine aastast **1755** varasemate aastate poole?

Levinud on väide, et kui päikeseplekke on rohkem, siis vaatamata tumedatele aladele on Päike tervikuna siiski intensiivsem kiirgaja ja solaarkonstant suurem. Vaid väga üksikud autorid julgevad arvata, et teatud päikeseplekkide arvust alates hakkab Päikeselt lähtuv kiirgus vähenema (joon. 10).



Joon. 10. Toodud kirjandusviite järgi on solaarkonstandi maksimum plekkide arvu  $N = 84$  juures. (Atm-Opt-I\Solaarkonstant\So ja päikeseplekid Coulson 1975.xls; Kinsell L. Coulson, 1975, p. 245.)

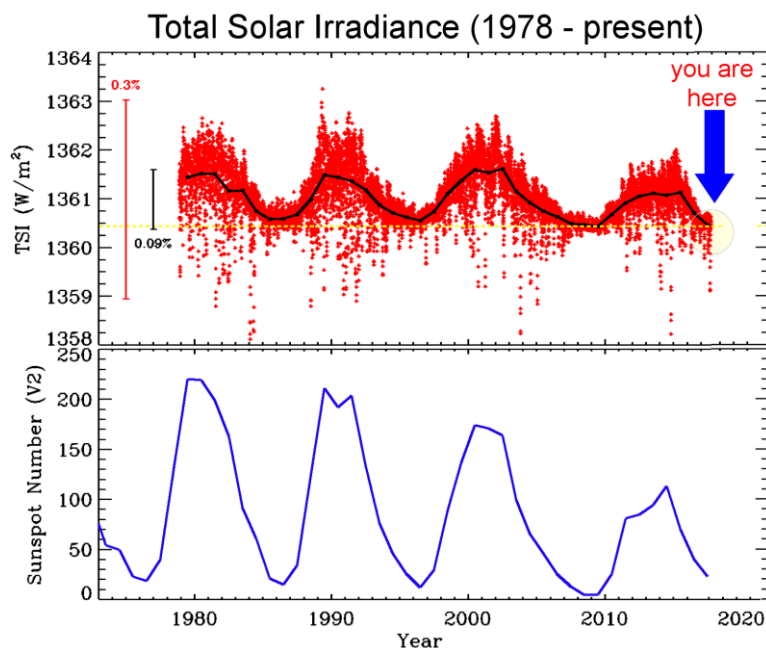
Päikeseplettide arvu järgi on taastatud solaarkonstandi muutumine viimase 400 aasta jooksul (joon. 11, võrreldes joonisega 9).



Joon. 11. Solaarkonstandi muutumise 400-aastane rekonstruktsioon.

A historical model reconstruction of TSI since the Maunder minimum (based on Krivova, 2010; Ball, 2012; Yeo, 2014, Coddington 2015, Kopp 2017). <http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>

Solaarkonstandi ja päikeseplettide arvu muutumine viimastel aastakümnetel, kuni 2017. aasta alguseni, on järgmisel joonisel. Joonise ülemise paneeli vasakus servas on 0.3% ja 0.09% muutuste ulatus eraldi välja toodud. Sellest järeldub, et solaarkonstandi libisev keskmine on muutunud ca 0.1% ulatuses. Joonisel on väga tundlik vertikaaltelg.

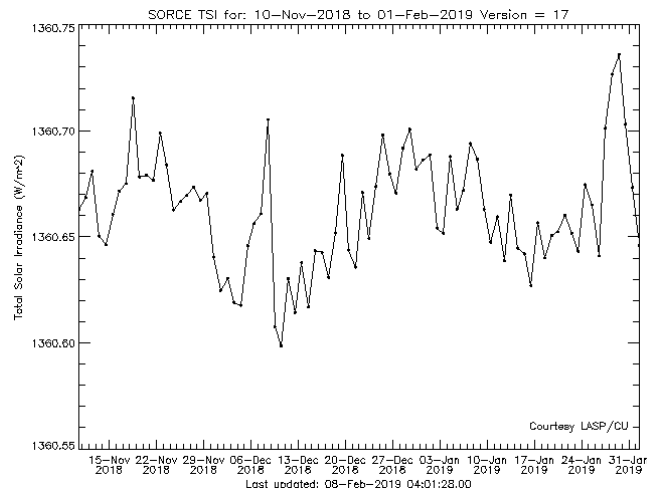


Joon. 12. Solaarkonstant ja päikeseplekid kuni 2017. aasta alguseni.

<https://spaceweather.com/images2017/15dec17/tsi.png?PHPSESSID=bmek7e7q8io5dupeq59re26027>

Solaarkonstandi muutumine ühe aasta jooksul, päevade kaupa, kuni 2019. aasta jaanuari lõpuni on järgmisel joonisel (veebuaris 2020 polnud see veebiaadress enam kättesaadav).



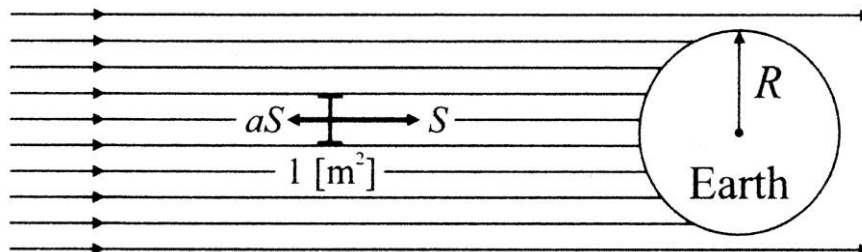


Joon. 13. Solaarkonstant kuni 31. jaan 2019. Ka siin on vertikaaltelg väga tundlik (võrrele solaarkonstandi maksimum- ja miinimumväärtusi).

[http://lasp.colorado.edu/data/sorce/total\\_solar\\_irradiance\\_plots/images/tim\\_level3\\_tsi\\_24hour\\_3month\\_640x480.png](http://lasp.colorado.edu/data/sorce/total_solar_irradiance_plots/images/tim_level3_tsi_24hour_3month_640x480.png)

### 1.9. Maa kiirgustemperatuur, kasvuhooneefekt

Kujutleme end vaatlejana kosmoses ja üritame hinnata eemalasuva Maa kiirgustemperatuuri. Koostame lihtsa kiirgusliku tasakaalu mudeli. Eeldame, et planeedi Maa poolt neelatud Päikese lühilaineline kiirgus on võrdne Maa poolt kiiratud pikalainelise kiirgusega. Küsimus atmosfääri olemasolust, temperatuuri vertikaalsest profiilist ja aluspinna temperatuurist jääb sellises mudelis ebamääraseks. Alustamiseks on mõistlik on oletada, et süsteemi *atmosfäär-aluspind* väliskihis on, kogu selle ulatuses, ühtlane temperatuur  $T$  ning see kiht kiirgab nagu must keha. Arvutame väliskihi tasakaalulise temperatuuri  $T$ .



Joon. 14. Maa atmosfääri ülapiirile langevad Päikese kiired võib lugeda paralleelseteks. Eemalt vaadates on Maa kettakujuline. (Boeker, Grondelle, 2011)

$S, S_0 = 1.367 \text{ kW m}^{-2}$  – solaarkonstant, Päikese kiiritustihedus Maa-Päike keskmisel kaugusel;

$S \times \pi R^2$  planeet Maa ristlõikele langev kiirgusvoog;

$R = \dots$  Maa raadius, antud ülesandes pole arvulist väärtust vaja teada, taandub välja.

$a, A = 0.30; 0.31$  – Maa (lühilaineline) planetaarne albeedo ehk peegeldusvõime; esmalt määrati Kuu tuhkvalguse järgi;

$(1 - a)$  – seega neelab Maa ristlõike sellise osa ristlõikele langevast päiksekiirgusest.

Edasi oletame, et kehtib kiirgusenergeetiline tasakaal, neelatud lühilaineline kiirgus on võrdne Maa poolt kiiratud pikalainelisele, vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele:

$\sigma = 5.671 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  – Stefan-Boltzmanni konstant;

$$\underbrace{(1-a)S \times \pi R^2}_{\text{neelatud lühilaineline}} = \underbrace{\sigma T_{\text{Maa}}^4 \times 4\pi R^2}_{\text{kiiratud pikalaineline}} \quad | : \pi R^2 \quad (1.9.1)$$

$$(1-a)S = \sigma T_{\text{Maa}}^4 \times 4, \quad (1.9.2)$$

Kui õigustatud on lühi- ja pikalainelise kiirguse kontseptsiooni kasutamine?

Atmosfääri ülapiirile langevat Päikese kiirgust nimetatakse **lühilaineliseks**. Kui modelleerida seda temperatuuri **6000 K** omava musta keha kiirgusega, siis **99.6%** kiirgusest on lainepikkusega  $< 5 \mu\text{m}$ .

Maa vastukiirgust nimetatakse **pikalaineliseks**. Temperatuuri **250 K** ( $-23^\circ\text{C}$ ) omava musta keha kiirgusest **99.6%** kiirgusest on lainepikkusega  $> 5 \mu\text{m}$ . (Goody, Yung, 1995, 29–30.)

Pöördume tagasi valemi (1.9.2) juurde ja avaldame planeet Maa kiirgustemperatuuri:

$$T_{\text{Maa}} = \left( \frac{(1-a)S}{4\sigma} \right)^{1/4} = \left( \frac{0.7 \cdot 1367}{4 \cdot 5.671 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = \left( 42.18 \cdot 10^8 \right)^{1/4} = \underbrace{255 \text{ (K)} = -18^\circ\text{C}}_{\text{Maa kiirgustemperatuur (1.9.3)}}$$

Meteovaatluste järgi on on planeedi aluspinnalähedane keskmine õhutemperatuur hoopis  **$15^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$** .

Seega on aluspinnalähedase tegeliku temperatuuri ja kosmosest määratava kiirgustemperatuuri erinevus  **$33^\circ\text{C}$** . Maa tundub eemalt vaadates hoopis külmem kui on atmosfääri all.

Tegelikult pärineb süseemi “Maa-atmosfäär” kosmosesse kiiratud kiirgus, mida väljendab valemi (1.9.1) parempoolne osa, põhiliselt atmosfäärist, mitte aluspinnalt. Tasakaaluline kiirgustemperatuur,  **$-18^\circ\text{C}$** , on omane kõrgusele umbes **5 km**.

Loomulikult kiirgab soojuskiirgust (Stefan-Boltzmanni järgi) ka aluspind oma planetaarse keskmise temperatuuriga  **$15^\circ\text{C}$** , kuid see kiirgus neeldub atmosfääris ja umbes poole sellest kiirgab atmosfäär, Stefan-Boltzmanni seaduse järgi, allapoole, aluspinnale tagasi, see on atmosfääri nn *vastukiirgus*. Atmosfäär on nagu läbipaistev tekk või kasvuhooneklaas, mille all on soojem. Öisel ajal on aluspinnale tähtis soojust isoleeriv osa pilvedel. Teise poole neeldunud pikalainelisest kiirgab atmosfäär koos pilvedega aga ülespoole, kosmosesse.

Atmosfääri all, otsekui kasvuhoones kujunevat soojemat olukorda nimetatakse *kasvuhooneefektiks*.

Tähtsaimaks kasvuhoonegaasiks on **veeaur**, teisel kohal on **süsihappegaas**.

When ranked by their direct contribution to the greenhouse effect, the most important gases are:

Compound	Formula	Contribution, %
Water vapor and clouds	H <sub>2</sub> O	36 – 72%
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	9 – 26%
Methane	CH <sub>4</sub>	4 – 9%
Ozone	O <sub>3</sub>	3 – 7%

[http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse\\_gas](http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas)

## 1.10. Planeet Maa energiabilanss

Kaasaegne täpsem Maa energiabilanss, planetaarselt keskmistatuna, on koostatud Šveitsi teadlase Martin Wildi juhtimisel.

**$340 \text{ W/m}^2$**  – a global average solar irradiance, **100%**;

**$0.087 \text{ W/m}^2$**  – the Earth's internal energy, (geothermal heat, not shown);

**$0.025 \text{ W/m}^2$**  – the heat produced by burning of fossil fuels (not shown);

Joonise mõistmiseks liigume alla mööda laia kollast vektorit,  **$340 \text{ W/m}^2$** , see on atmosfääri ülapiirile langeva kiirguse vootihedus. Sellest  **$80 \text{ W/m}^2$**  neeldub atmosfääris (ka pilvedes),  **$75 \text{ W/m}^2$**  hajub ja peegeldub (ka pilvedelt) tagasi üles.

**$75 \text{ W/m}^2$**  – the energy scattered and reflected back to space by the atmosphere, incl. clouds;

**$340 - (80 + 75) = 185 \text{ W/m}^2$**  – downward solar energy near the surface; **54.4% of sol.** const.;

**$80 \text{ W/m}^2$**  – the energy absorbed in the atmosphere; **23.5%** of solar constant;

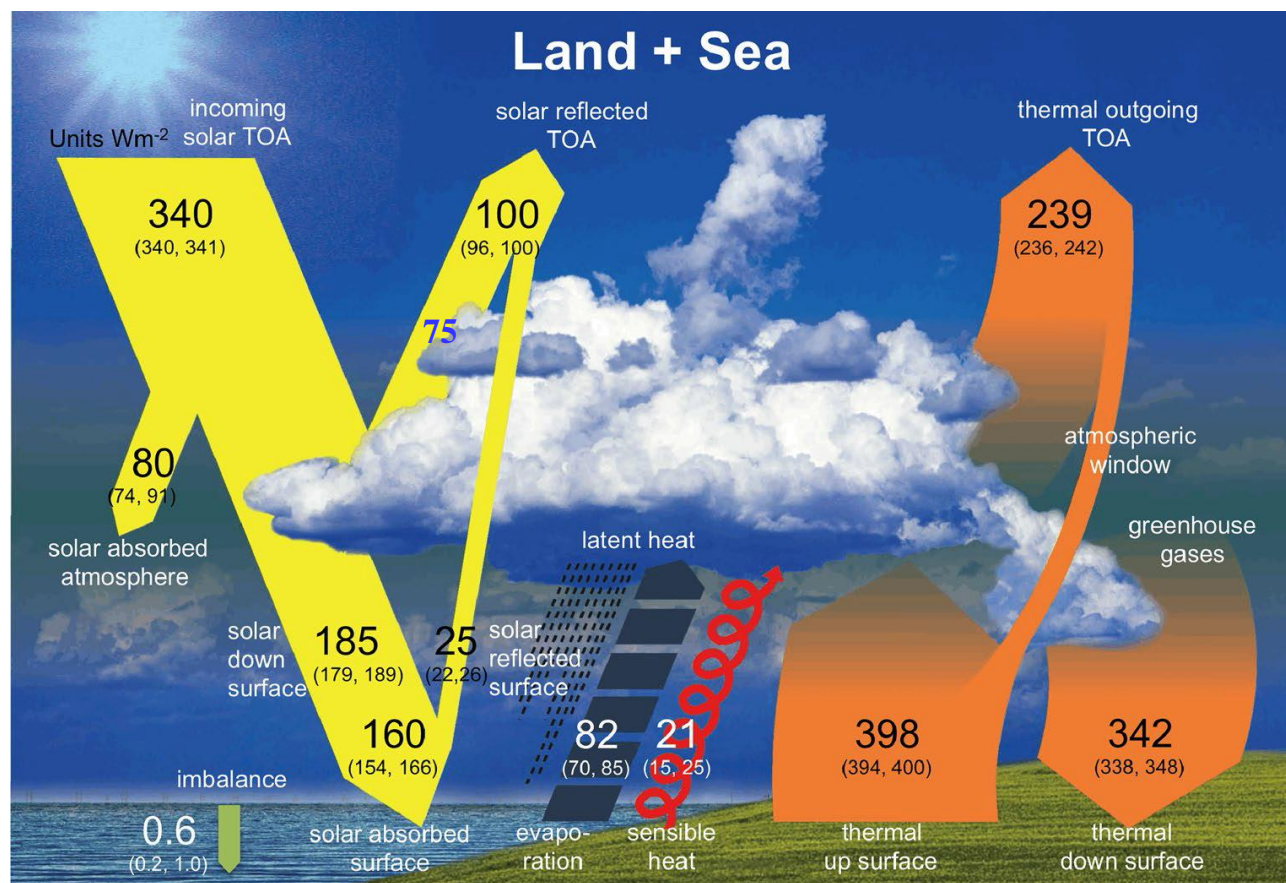
**$25 \text{ W/m}^2$**  – solar upward energy reflected from the surface; **7.35%** of solar constant;

**$(25/185) \times 100\% = 13.5\% = \text{surface albedo}$** ;

**$75 + 25 = 100 \text{ W/m}^2$**  – the energy reflected back to space (scattering from clouds, aerosols, the Earth's surface, **29.4%** of solar constant; **the planetary albedo =  $100/340 = 0.294$ , i.e. 29.4%**;

**$185 - 25 = 160 \text{ W/m}^2$**  – solar absorbed by surface; **47.0%** of solar constant;

**$82 \text{ W/m}^2$**  – evaporation, **24%** of solar constant.



### Joon. 15. Süsteemi 'atmosfäär-aluspind' energiabilanss.

Schematic diagram of the global mean energy balance of the Earth. Numbers indicate best estimates for the magnitudes of the globally averaged energy balance components together with their uncertainty ranges, representing present day climate conditions at the beginning of the twenty first century. (M. Wild et al., 2015)

**21 W/m<sup>2</sup>** – sensible heat (tajutav soojus, kontaktne soojusvahetus); **5.9%** of solar constant; “Sensible heat flux is the transport of heat by turbulence, if the air is cooler than the ground, air parcels in contact with the ground are warmed and vertically mixed by turbulence.” M. Wild (personal communication).

Selle joonise järgi suundub piirist TOA allapoole **lühilainelist kiirgust** (atmosfääri ülapiiri lühilaineline kiirgusbilanss):

$$340 - 100 = 240 \text{ W/m}^2;$$

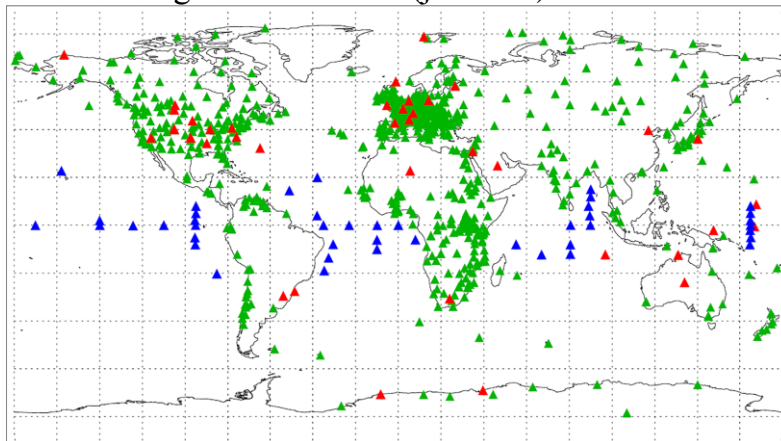
piirist TOA suundub ülespoole **pikalainelist**:

$$239 \text{ W/m}^2.$$

**NB!** Lühilainelise bilansi ja lahkuva pikalainelise vootiheduse erinevus, ehk **energia juurdevool planeedile**, on **1 W/m<sup>2</sup>**. Joonisel, vasakul all, “**imbalance = 0.6**”.

**NB!** Pöörake tähelepanu nivool TOA saabuva voo ja lahkuvate voogude määramatustele.

Toodud planetaarse energiabilansi diagrammi koostamisel kasutas M. Wildi töörühm globaalsete kiirgusmõõtmiste võrgustike andmeid (joon. 16).



Joon. 16. Kiirgusmõõtmiste vaatlusjaamade paigutus.

Location of surface radiation stations used in this study. 760 sites from GEBA (**green**), 41 sites from BSRN (**red**) and 43 ocean **buoys**. (M. Wild et al., 2015)

**GEBA** – the Global Energy Balance Archive

**BSRN** – the Baseline Surface Radiation Network

## 1.11. Personalia



Joon. 17. Dr. Christian A. Gueymard is in his 60's.

USA-s töötav, Prantsusmaal ja Šveitsis hariduse saanud teadlane. Kompetents päikesekiirguse läbimisest erinevalt “komponeeritud” atmosfääridest, vastavate arvutusmodelite koostamine. Ajakirja *Solar Energy* teadustoimetaja.





Joon. 18. Prof. Dr. Martin Wild. Maailma juhtiv kiirkliimatoolog. Institut für Atmosphäre und Klima, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH, Swiss Federal Institute of Technology), Zürich, Switzerland.

<http://www.iac.ethz.ch/people-iac/person-detail.html?persid=37854>  
[Dep. of Environmental Systems Science](#)

Eidgenosse – šveitslane; Eidgenossenschaft – Šveitsi konföderatsioon.



Joon. 19. Markku Kulmala (born Oct. 30, 1958; age 61 years, *Wiki*). Atmosfääriaerosoolide uurija, Helsingi Ülikooli professor, akadeemik, TÜ audoktor. Aerosoolide teke põhjamaises metsas (boreal forest). Mets globaalse soojenemise tasakaalustajana.

Eriline võimekus projektide rahastamise saavutamisel.

?? Järgmine füüsika nobelist ??

---

**Ülesanne 1.** Solaarkonstant,  $S_0 = 1.367 \text{ kW m}^{-2}$ , Maa-Päike kaugus,  $\rho = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Arvutada Päikese kui kiirkliimallika energeetiline võimsus  $E$ . (3.86 · 10<sup>23</sup> kW)

**Ülesanne 2.** Maa solaarkonstant,  $S_0 = 1.367 \text{ kW m}^{-2}$ , Veenus-Päike kaugus,  $\rho_{\text{Venus}} = 0.72 \text{ AU}$ , Mars-Päike kaugus,  $\rho_{\text{Mars}} = 1.52 \text{ AU}$ . Arvutada solaarkonstandid Veenuse ja Marsi jaoks. (2.637, 0.592)

---

### Enesekontrolliks ja aruteluks

- Kiirkliimamõõtmiste vaatlusjaamade kaardil (joon. 16), leida järgmised objektid:
  - Tõraverre;
  - ekvaator; Greenwichi meridiaan;
  - märgistage laiuskraadid;
  - Drake'i väin, Antarktika poolsaar.
- Arutlege, miks Antarktikat ümbritseva nn Lõunaookeani temperatuur on nii madal (joonised 20, 21, 22), vaatamata laiuskraadile?



Joon. 20. Antarktika kontuurkaart. Poolsaare tipu lähedal paikneb Deception'i saar.

*deception* – pettus, kavalus

Drake'i väin – the *Drake Passage* (Spanish: *Pasaje de Drake*), 800 km (500 mi). Turismilaevad läbivad väina pisut kiiremini kui 2 ööpäevaga.

Kuninganna Maudi Maal asuva Soome Antarktika uurimisjaama Aboa direktoriks (Development Manager) on eestlane, füüsik, PhD, kes?



Joon. 21. Drake'i väinas asuva Deception'i saare keskel asub Port Fosteri basseinilaadne (10 × 7 km) sadam, aktiivse vulkaani kraater. Sisepääs lahte on vaid 560 m lai. Tormise Drake'i väina läbimise järel on laht suurepäraseks peatuspaigaks turismilaevadele.

Kes Eesti teadlastest on giidina kaasas Albion Reisid gruppidel, mis talviti külastavad Antarktikat?



Joon. 22. Port Fosteri lahes pakutakse turistidele võimalust supelda miinuskraadidega vees. Alumistel fotodel on vette hüppamas TÜ geograafia ajaloo vanemteadur Erki Tammiksaar, 01. jaan 2018, vee temperatuur on, NB! **“− 1.6 °C”** (E. Tammiksaare erakogu).

3. Kuidas selgitaksite mõistet “voog” (kiirusvoog, valgusvoog, energiavoog jne)?

4. Mis on aktinomeetria?

5. Selgitage mõisteid: otsekiirus, hajuskiirus, summaarne kiirus, peegeldunud kiirus, albedo.



6. Kuidas määrati, enne satelliite, solaarkonstant ja Maa planetaarne albeedo?
7. Mis muudab atmosfääri neeldumiskoeffitsienti aluspinna pikalainelisele kiirgusele?
8. Miks võib solaarkonstant aastatega muutuda?
9. Inimkond suurendab aasta-aastalt fossiilsete kütuste põletamist. Tõenäoselt viib see nii CO<sub>2</sub> kui aerosooliosakeste kontsentratsiooni kasvule. Kas seoses sellega kliima soojeneb või jaheneb, arutlege. Vastates võiks tuua analoogia Krakatau (Krakatoa, 1883 Indoneesia) purske tagajärgedega (vt Wikipedia).
10. Kas planetaarset albeedot saaks kunstlikult vähendada-suurendada kliima soojendamiseks või jahutamiseks, olete kuulnud vastavatest ulmelistest ideedest?
11. Millised oleksid suure vulkaanipurske, tuumasõja ja asteroidiga kokkupõrke kliimaatilised tagajärjed? Vastates võiks jällegi tuua analoogia Krakatau purskega.
12. Dinosaurused hävisid ca 66 mlj aasta eest, mis võis olla nende hävimise põhjus?
13. Kui suur on joonise 15 järgi solaarkonstant?
14. Mida tähendab joonisel 15 lühend TOA?
15. Joonise 15 vasakul allosas on märkus, imbalance, **0.6 Wm<sup>-2</sup>**, kuidas seda seletada, mingite numbritega põhjendada?
16. Kas jaanuarikuul Brasiilias võib päevitades saada liigdoosi (päiksepõletuse) kiiremini kui juunis-juulis samal päikesekõrgusel Eestis?